doi:10.13866/j.azr.2019.01.16

冷荒漠草本植物数量特征对不同水分输入和气象因子的响应①

范连连[1,2,3]， 李耀明[1,2]， Nataliia Terekhina[4]， 马学喜[1,2]， 马 杰[1,3]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011；
2. 中国科学院中亚生态与环境研究中心，新疆 乌鲁木齐 830011；
3. 中国科学院阜康荒漠生态系统研究站，新疆 阜康 831500；
4. Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia, 190121）

摘 要：草本层是古尔班通古特沙漠植被的重要组成部分，在维持沙漠稳定、养分循环等方面具有重要意义。水分通常以积雪和降雨形式输入到土壤，输入方式及数量变化对荒漠植物的存活和生长有重要影响。本文以古尔班通古特沙漠南缘草本层为研究对象，利用人工增减积雪的方法，共设置4个积雪处理（0，50%，100%，200%积雪，其中100%积雪为对照），于2009—2016年春季调查草本植物的数量特征和物种丰富度，分析草本植物数量特征对水分变化的响应；同时结合气象数据，分析不同年份一年生荒漠草本植物数量特征与主要气象因子的关系。结果表明：表层土壤含水量与积雪厚度成正比，相应的草本植物的幼苗密度与积雪水当量、表层土壤含水量成正比关系；2009—2016年，年内积雪量的变化对物种丰富度没有显著影响，各积雪处理间物种丰富度差异不显著；2009—2016年自然处理下年际间物种丰富度差异显著，2015年物种丰富度显著小于其余年份。结合气象数据分析发现，物种丰富度年际变化主要受幼苗建成期的降雨调控，并且干旱年份过后的湿润年份物种丰富度不受前一年降水的影响，说明荒漠草本植物层片具有较强的自我调节能力；自然处理下，不同年份草本植物旺盛期的存活数量与大气干旱程度（空气饱和差）呈显著负相关关系（R^2 值为0.611，$P<0.05$），与生长季的降雨量呈正相关关系（R^2 值为0.162，$P>0.05$），说明大气干旱程度更能表征荒漠草本植物生长峰值期的存活情况。

关键词：荒漠植物；数量特征；降水；大气干旱；气象因子；古尔班通古特沙漠

在荒漠生态系统，水是影响植物生长的最主要限制因子，年降水格局在干旱区生态系统植物用水策略以及决定植物群落组成方面起到关键作用[1-3]。降水主要以降雨和降雪方式输入到陆地生态系统，季节性积雪消融可以提高土壤墒情，为植物种子萌发和生长创造条件，也对维持荒漠生态系统的稳定具有重要作用[4-6]。

古尔班通古特沙漠为我国第二大沙漠，年降水量70～150 mm，该沙漠在冬季有稳定积雪存在，最大积雪深度在20 cm以上，持续时间一般为3～5个月。3月中上旬是积雪消融期，为植物生长发育提供了良好的水分条件[7]。在该沙漠植物群落草本层构建者主要为短命植物、类短命植物和一年生长营养期植物，其中短命植物和类短命植物占80%以上[8]。这类草本植物在早春快速生长，使古尔班通古特沙漠植被盖度最高可达40%以上[9]，不仅在维持沙漠稳定、保护生态环境有着不可替代的作用[10]，同时对荒漠生态系统养分循环有重要作用。相关研究表明，在生长季，短命植物层片是一个大的养分库，而短命植物层片死亡之后，仅半年的时间便可释放枯落物中35%的N和60%的P，为后继灌林和一年生草本植物生长提供了养分[11]，对该区草本层植物的研究有重要的生态学意义。

通常在干旱区，降水发生的天数在10～50 d，降水事件3～15次[12]，因此，降水的时间分配对植物的生长发育是重要影响因子，如何能够高效利用有效降水是物种存活和延续的关键。有研究发现，当一次性降水大于25 mm时，才能激发荒漠植物种子

① **收稿日期：**2018-07-01； **修订日期：**2018-08-13
基金项目：国家自然科学青年基金项目（31400394）；荒漠与绿洲生态国家重点实验室开放基金（1100002394）；国家自然基金委-新疆联合基金项目（U1603105）资助
作者简介：范连连（1983- ），女，博士，主要从事荒漠植物水分关系的研究. E-mail：flianlian@ms.xjb.ac.cn
通讯作者：李耀明. E-mail：lym@ms.xjb.ac.cn

萌发,从而进行生长发育[13]。也有研究表明在荒漠植物种子萌发阶段,有春季降雨与没有春季降雨的萌发率没有显著差异[14],这说明荒漠植物的萌发策略具有多样性。孙羽等[15]的研究表明,在降水增加的背景下,会显著提高荒漠植物的密度和植被盖度。Jankju[16]的研究同样发现,一年生草本植物的幼苗密度在多水分处理时最高。也有研究发现,在减少水分总量50%的情况下,不同群落的多样性、植物盖度、密度均减小,而在减少水分总量25%的情况下,短期内不同群落的植物的多样性、盖度、密度并未显著降低[17]。

对古尔班通古特沙漠草本植物而言,其生长周期短,主要是利用冬季积雪和早春降雨完成生活史[18]。因此积雪和降雨作为生长发育的重要因子,其变动必然会对草本植物的萌发及后期的生长产生影响[19]。研究表明,短命植物的分布与水分条件是相对应的,在较好的土壤水分条件下物种多样性较高[20-21],短命植物的可塑性较强,其生活周期可以延长[22-23]。在古尔班通古特沙漠虽然降雨和冬季积雪能够为该区的草本植物提供水分,但降水发生的时间和强度多变[7],大气干燥程度会随相邻两次降雨间隔时间的延长而增大,进而影响到植物的生长。一年生草本植物作为古尔班通古特沙漠的重要组成部分,其萌发、定居和存活关系到物种的延续和荒漠生态系统稳定性的维持。近年来有数据表明,新疆冬季降水量的波动显著加强[24],水分输入的不确定性加剧。然而,水分输入的变化如何影响草本植物存活与群落特征,目前还缺乏系统的试验数据来解释。本文以古尔班通古特沙漠南缘一年生草本植物为研究对象,利用人工增减积雪的方法,研究一年生荒漠草本植物数量特征与积雪以及同期气象因子的关系,为进一步研究荒漠草本植物对积雪变化和环境气象因子响应的规律提供理论依据和科学支撑,对荒漠植被保育具有重要意义。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

试验区位于古尔班通古特沙漠南缘,该区域受大陆性干旱气候的控制,夏季炎热而冬季寒冷,年最高气温42.6 ℃,最低气温 -41.6 ℃,年平均气温6.2 ℃。年降水量在70~150 mm,冬春两季降水量占全年的30% ~45%,年潜在蒸发量约2 000 mm[25-26]。在冬季,古尔班通古特沙漠有稳定的积雪,最大积雪深度在20 cm以上,持续时间一般为3~5个月。3月中上旬是积雪消融期,为植物生长发育提供了良好的水分条件[7]。沙漠内草本植物种类相对较丰富,常见种有小花荆芥(*Nepeta micrantha*)、条叶庭荠(*Alyssum linifolium*)、齿稃草(*Schismus arabicus*)、飘带果(*Lactuca undulata*)、尖喙牻牛儿苗(*Erodium oxyrrhynchum*)、粗柄独尾草(*Eremurus inderiensis*)、黄花瓦松(*Orostachys spinosus*)、土大戟(*Euphorbia turczaninowii*)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)等[10-11]。

1.2 样地布设

本试验进行于2008年10月至2016年7月。2008年10月在古尔班通古特沙漠南缘44°12′~44°21′N,87°50′~87°54′E,选择有代表性的平缓沙丘斜坡(沙丘南北走向)作为试验小区,在每个小区内自斜坡上部到下部设置大小为5 m × 15 m的样方4个,作为4个不同处理,从南往北依次为200%积雪、0积雪、100%积雪和50%积雪,共5个小区作为重复。小区之间相隔300~500 m,大样方之间间隔3~5 m。各处理之间用塑料隔板(PVC,3 mm厚度)埋入沙土中和外界隔开,由于该区草本植物根系深度基本在60 cm以内,故PVC隔板埋入深度为60 cm,以防止样方与外界的水分交换。同时,于每个大样方中随机设置3个1 m × 1 m的小样方进行植物调查。

积雪量控制试验共计4个处理,每个处理5个重复。各处理依次为:0积雪、50%积雪、100%积雪、200%积雪,其中100%积雪为当年正常积雪量(积雪厚度),样地布设如图1。每年2月积雪稳定后,根据当年的积雪量进行积雪处理。

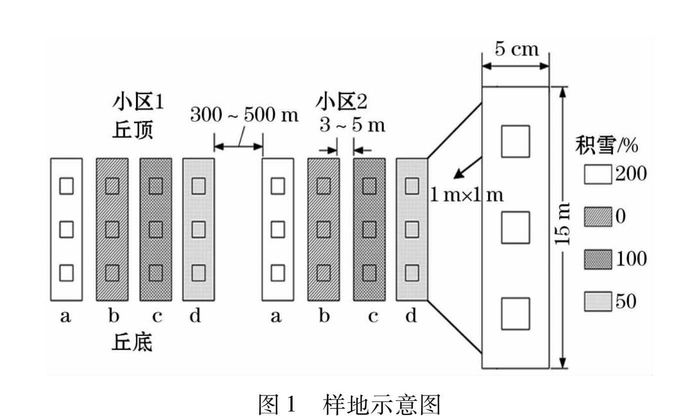


图1 样地示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sample plots

1.3 数据采集

每年积雪稳定后,在研究区周围取 1 m × 1 m 的样方测定积雪厚度,同时收集样方内积雪,待其融化后过滤,称重获得一次性水当量(mm),共取 5 个重复。积雪融化后,调查每个 1 m × 1 m 样方内草本层物种数、密度。调查从 3 月底草本植物萌发开始,当幼苗密度稳定时,每半个月做一次密度调查,直至植物枯萎。土壤水分的监测采用烘干法,用铝盒取土,105 ℃烘 24 h 至恒重,取样深度为 0 ~ 5 cm、5 ~ 20 cm,每个处理 5 个重复。气象数据通过中国科学院阜康荒漠生态站和古尔班通古特沙漠南缘设立的长期试验样地气象站获得。

1.4 数据处理分析

数据采用 SPSS 13.0 做单因素方差分析。不同积雪处理幼苗密度与水当量的关系采用多年平均值作图,旺盛期草本植物存活率与空气饱和差、降雨的关系采用每一年自然处理数据计算。空气饱和差(d)综合反映了大气的湿度和温度情况,因此本研究采用空气饱和差来描述大气干燥程度。

$$d = e_s - e_a \tag{1}$$

$$e_s = 6.11e^{\frac{17.269t}{237.3+t}} \tag{2}$$

$$RH = \frac{e_a}{e_s} \times 100\% \tag{3}$$

式中:d 代表空气饱和差;e_s 代表饱和水汽压;e_a 代表实际水汽压;RH 代表相对湿度;t 代表温度,℃。

2 结果与分析

2.1 研究区气象数据

2009—2016 年,年际间积雪厚度的变化较大(11.4 ~ 35 cm),一次性融雪水当量介于 19.3 ~ 64.4 mm,最大积雪年份发生在 2010 年,最小积雪年份发生在 2015 年。2012 年积雪厚度与 2015 年积雪厚度相等,为12 cm,其他年份积雪量基本在

表 1 2009—2016 年积雪量以及草本植物生长季降雨量

Tab. 1 Snow cover thickness and precipitation in growing season of herbaceous plants from 2009 to 2016

年份	积雪厚度/cm	水当量/mm	降雨量/mm				年份	积雪厚度/cm	水当量/mm	降雨量/mm			
			3 月	4 月	5 月	3—5 月				3 月	4 月	5 月	3—5 月
2009	20.0	38.5	15.5	32.8	27.1	75.4	2013	23.4	40.6	4.6	39.3	9.9	53.8
2010	35.0	64.4	0.3	18.8	5.6	24.7	2015	11.4	19.3	2.9	16.7	15.0	34.6
2011	27.0	48.2	4.4	24.4	23.2	52.0	2016	26.3	42.1	5.3	43.1	15.8	64.2
2012	12.0	20.4	5.0	10.2	10.8	26.0							

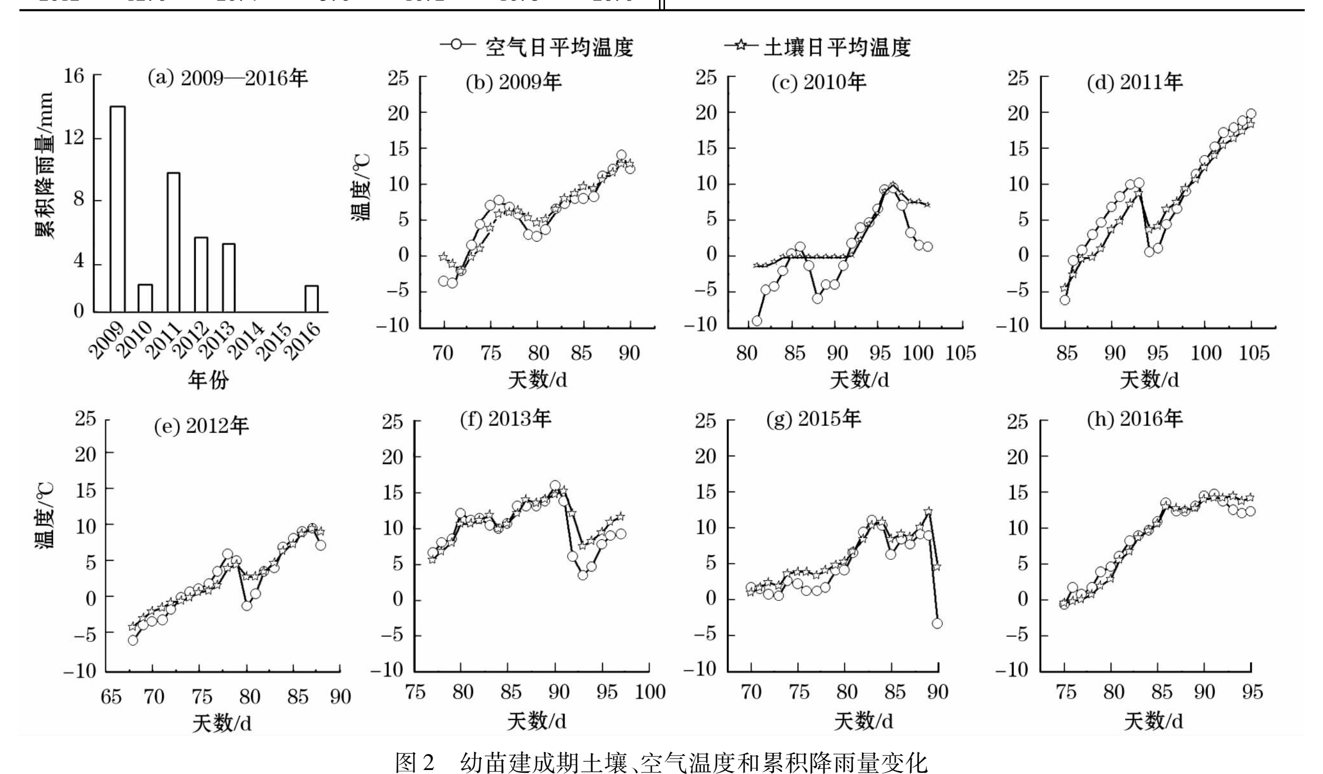


图 2 幼苗建成期土壤、空气温度和累积降雨量变化

Fig. 2 Daily average air and soil temperature and total precipitation during seedling establishment stage

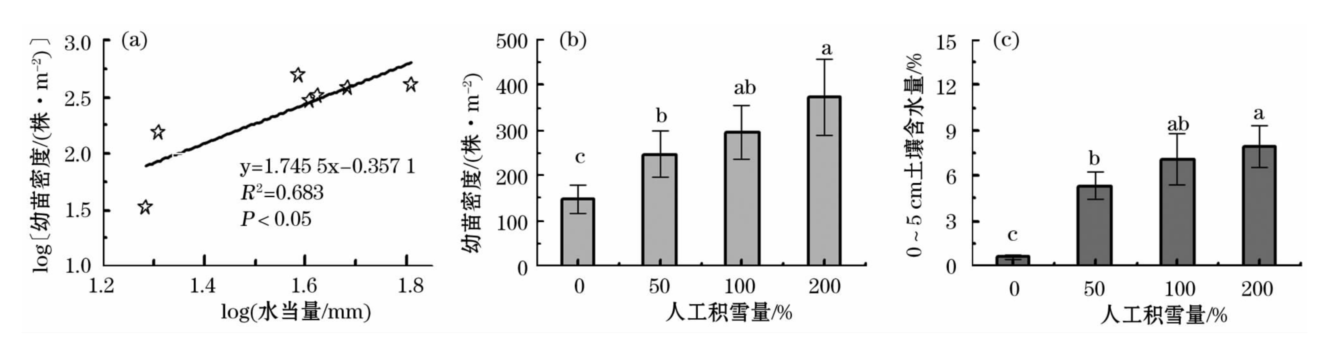
20～35 cm(表1)。2009—2016年,在草本植物幼苗建成期(3月底到4月初),除了2015年,其他年份均有降雨发生,降雨次数少则2次,多则4次,累积降雨量最小为1.7 mm,最大为13.9 mm(图2a)。在草本植物生长期内,2010年和2012年降雨量较少,分别为24.7和26 mm,其他年份降雨量则较多(表1)。在草本植物幼苗出土前后(3月底到4月初),空气日平均温度和0～10 cm土壤日平均温度呈持续上升的趋势,虽然有波动,但基本在0 ℃以上(图2b～2h),因此温度对幼苗的建成不存在威胁。2015年是一个积雪少、降雨也相对少的年份,尤其是在草本植物幼苗建成期,并无降雨发生。

2.2　草本植物幼苗数量与积雪的关系

如图3所示,积雪融化相当于一次大的降雨,积雪越多,融化后水当量越大,表层土壤含水量也越高。在0积雪处理,土壤含水量为0.6%左右,而在200%积雪处理土壤含水量则升高到8%左右。草本植物幼苗的数量与积雪水当量呈显著正相关关系,积雪越厚,融化后补给土壤的水分越多,土壤含水量越高,越有利于草本植物种子的萌发,草本植物幼苗的数量与积雪水当量呈正相关关系,所以随着积雪的增加,草本植物幼苗的数量也在增加(图3a,3b),从0积雪处理148株·m^{-2}增加到200%积雪的374株·m^{-2}。积雪的效应通过直接改变土壤含水量从而间接引起草本植物幼苗密度的变化。

2.3　草本植物物种丰富度的变化

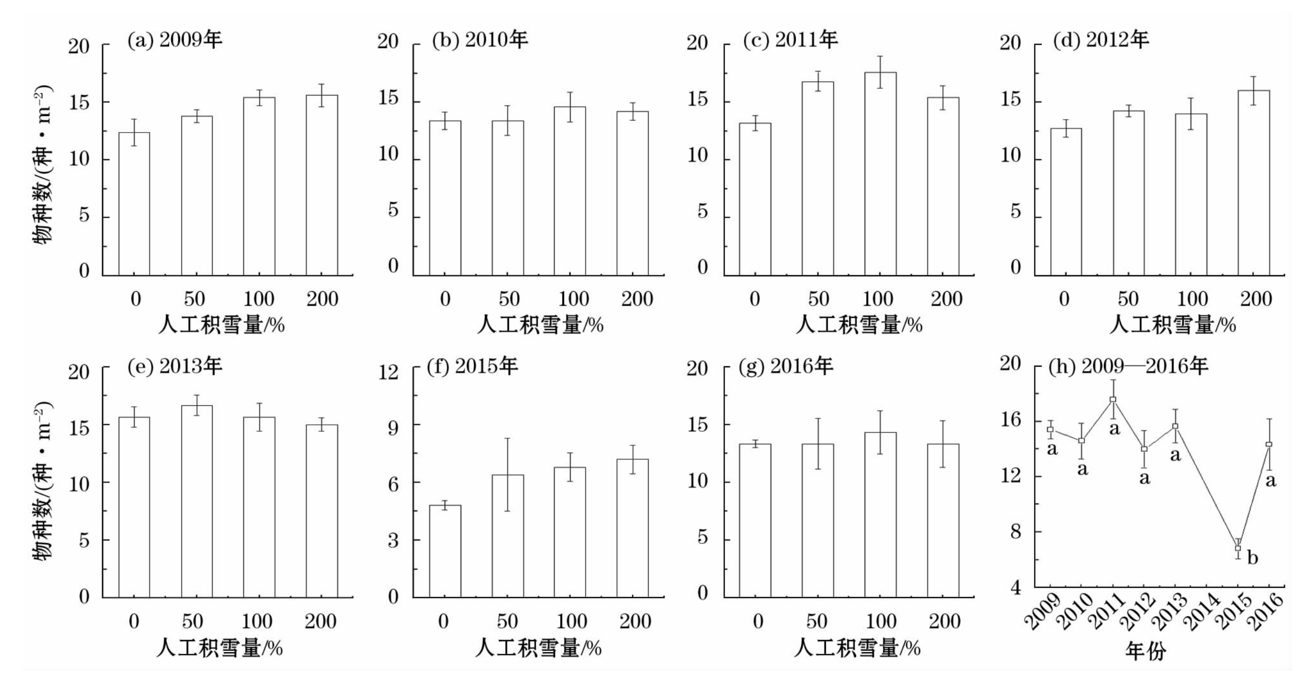
2009—2016年,年内积雪处理间物种数差异不显著(图4a～4g),年内平均物种数在12～15株·



注:不同小写字母表示在处理间差异显著(P<0.05)。

图3　草本植物幼苗密度与积雪量的关系(平均值±标准误)

Fig. 3　Relationship between seedling density and snow cover thickness (mean ± SE)



注:不同小写字母代表年际间物种丰富度差异显著(P<0.05)。

图4　不同积雪处理间物种丰富度和自然条件下年际间物种丰富度的变化(平均值±标准误)

Fig. 4　Change of species richness under different snow cover treatments and natural conditions in different years (mean ± SE)

m^{-2}(除2015年),2015年不同积雪处理间物种丰富度5~6株·m^{-2}。积雪的变化并未影响到物种多样性。由于年内不同积雪处理间物种多样性差异不显著,因此年际间物种多样性的对比数据采用了自然积雪处理(100%积雪)。由图4h可以看出,虽然年内积雪处理间物种丰富度没有显著差异,但是年际间物种丰富度有波动。2015年的物种多样性最低,其他年份差异不显著。通过表1和图2可知,2015年积雪和降雨都较少,而图4h也同样与之呼应,2015年的物种数最低。

2.4 草本植物旺盛期的存活数量与降雨和大气干燥程度的关系

2009—2016年,以自然处理的数据研究草本植物旺盛期个体存活数与降雨和大气干燥程度的关系。从图5a,5b可以看出,草本植物旺盛期个体存活数量与大气干燥程度呈显著负相关关系,相关系数为$R^2=0.611$($P<0.05$)。随着大气干燥程度的增加,草本植物旺盛期的存活数量越低。草本植物旺盛期个体存活数量与草本植物生长季内降雨量呈正相关关系,相关系数为$R^2=0.162$($R>0.05$)。虽然草本植物的密度与其生长期内降雨呈正相关关系,但是从相关系数以及显著性可以看出,大气干燥程度更能表征与草本植物存活的关系。

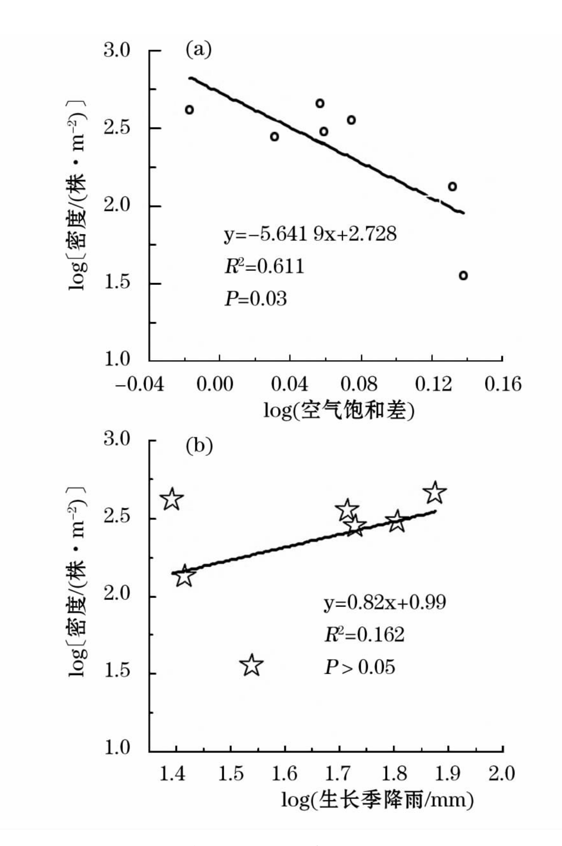


图5 草本植物的存活数量与降雨和大气干燥程度的关系

Fig. 5 Relationship between survival of herbaceous plants and precipitation and atmospheric dryness degree

3 讨论与分析

荒漠生态系统对气候变化敏感,尤其是降水时间和强度的变化将引起植物水分可利用性在时间和空间上的差异,进而引起植物种内、种间关系的变化,对荒漠植被组成产生重要影响[27]。种子萌发和幼苗定植是植物种群更新过程中的决定性阶段,直接决定着种群的延续、动态和分布[28-29]。种子萌发时以及幼苗阶段所遭遇的环境变化(如高低温、干旱等)是温带荒漠植物幼苗成功定居的关键[30-31]。单次降水量增加的大降水事件更有利于种子萌发出苗,也显著提高种子出苗速率[32]。本文结果表明,草本植物幼苗的数量与水当量呈显著正相关关系,随着积雪厚度的增加,草本植物幼苗的数量增加,这与前人的研究结果相类似。有的研究亦发现,由于早期幼苗对环境因子极为敏感,所以其数量随环境变化波动很大[33],而本实验结果也进一步说明了荒漠植物种子的萌发以及幼苗数量受水分变异的影响。

物种多样性是衡量一个地区生物资源丰富程度的客观指标,物种多样性对于维持生态系统的稳定性具有重要意义。物种多样性的变化受诸多因素的影响,但在干旱区,水分的变化对物种多样性的影响较大。常学礼等[34]对科尔沁沙地的研究发现,一年生植物种丰富度对降水量变化的响应最大,物种多样性指数随降水量变化而变化,二者呈正相关。辛智鸣等[35]对荒漠群落多样性研究表明,一年生草本植物对降水响应明显,而灌木与多年生草本植物对降水无响应。但是在本文中,积雪的变化所产生的直接效应仅调控了草本植物的出苗数量,年内对物种多样性没有显著影响,而年际间物种多样性有波动。这说明除了积雪,在幼苗建成期的其他环境因子(如气温,降雨等)对物种多样性也有影响。通过对2009—2016年草本植物萌发前后的气象数据分析可知,在幼苗出土前后的空气日平均温度和0~10 cm土壤温度波动不大,尤其是出苗后温度基本高于0 ℃,因此可以排除温度对幼苗建成的风险。结合降雨和积雪的年份分布发现,2015年的积雪量最少,并且在幼苗建成期,没有发生降雨,而其他年份均有降雨,相应的2015年的物种多样性最低。由

此推测在该研究区积雪融化后，春季是否有降雨对物种多样性建成有重要的作用。有研究发现，一个干旱年份可减少沙丘植物种的丰富度，而随后的恢复却需要 3 a 以上的时间[35]，但是在本研究区草本植物具有很强的恢复能力，2015 年物种多样性受干旱的影响最低，然而在 2016 年的湿润年份物种多样性迅速恢复到正常水平，这种快速调节适应能力对维持该区生态系统的稳定性具有重要意义。

干旱是荒漠生态系统的基本特征，既包括土壤干旱，也包括大气干燥程度。在沙漠地区降雨的时间和强度是不确定的，由此造成的土壤干旱和大气干燥都会对植物的生长产生影响。有研究表明，气温和土壤湿度的增加，都有利于荒漠植物种子的萌发[36]。不论是土壤干旱还是大气干燥都会对荒漠植物幼苗的存活生长起限制作用[37]，进而影响到种群的更新。空气饱和差综合反映了大气温度和湿度的指标，能够表征大气干燥的程度。在本研究中，草本植物旺盛期个体存活数量与大气干燥程度呈显著负相关关系，与草本植物生长季内降雨量呈正相关关系，相关系数分别为 $R^2 = 0.611$（$P<0.05$），$R^2 = 0.162$（$P>0.05$）（图 5）。在荒漠生态系统，2 次降雨之间的间隔时间是不确定的，间隔时间长不但会导致土壤湿度的降低，也会加剧大气的干燥程度，因此即使生长季内总的降雨量较高，也不见的完全影响植物的生长。

综上所述，古尔班通古特沙漠南缘的积雪在一年生草本植物的萌发阶段提供了必不可少的水分，积雪的变化控制了草本植物的幼苗密度，但是年内物种丰富度在不同积雪处理间差异不显著。年际间物种丰富度的波动主要受春季降雨的调控，同时草本植物的自我调节能力较大，在受到干旱影响后，在湿润年份会迅速恢复到正常状态。草本植物旺盛期的存活数量与大气干燥程度（空气饱和差）呈负相关关系，与生长季的降雨量呈正相关关系，R^2 值分别为 0.611（$P<0.05$）和 0.162（$P>0.05$），大气干燥程度更能表征与草本植物存活的关系。

4　结　论

在古尔班通古特荒漠生态系统，春季积雪融化后，表层土壤含水量与积雪厚度成正比，相应的草本植物的幼苗密度与积雪水当量、表层土壤含水量成正比关系；年内积雪变化仅调控了一年生草本植物的幼苗密度，对物种丰富度无显著影响，年际间物种丰富度差异则受幼苗建成期的降雨调控，并且干旱年份过后的湿润年份物种丰富度不受前一年降水的影响，说明荒漠草本植物层片具有较强的自我调节能力；自然处理下，不同年份草本植物旺盛期的存活数量与大气干燥程度（空气饱和差）呈显著负相关关系（R^2 值为 0.611，$P<0.05$），与生长季的降雨量呈正相关关系（R^2 值为 0.162，$P>0.05$），说明大气干燥程度在一定程度上决定了草本植物旺盛期的存活状况。

参考文献（References）：

[1] Susanne Schwinning, Ehleringer James R. Water use trade-offs and optimal adaptations to pulse-driven arid ecosystems[J]. Journal of Ecology, 2001, 89: 464 – 480.

[2] 许皓，李彦. 3 种荒漠灌木的用水策略及相关的叶片生理表现[J]. 西北植物学报，2005，25(7)：1 309 – 1 316. [Xu Hao, Li Yan. Water use strategies and corresponding leaf physiological performance of three desert shrubs[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2005, 25(7): 1 309 – 1 316.]

[3] 沈振西，周兴民，陈佐忠，等. 高寒矮嵩草草甸植物类群对模拟降水和施氮的响应[J]. 植物生态学报，2002，26(3)：288 – 294. [Shen Zhenxi, Zhou Xingmin, Chen Zuozhong, et al. Response of plant groups to simulated rainfall and nitrogen supply in alpine *Kobresia humilis* meadow[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2002, 26(3): 288 – 294.]

[4] 周宏飞，李彦，汤英，等. 古尔班通古特沙漠的积雪及雪融水储存特征[J]. 干旱区研究，2009，26(3)：312 – 317. [Zhou Hongfei, Li Yan, Tang Yin, et al. The characteristics of the snow-cover and snowmelt water storagein Gurbantunggut desert[J]. Arid Zone Research, 2009, 26(3): 312 – 317.]

[5] 谢敏，回嵘，刘立超，等. 降雪对荒漠地区藓类结皮中真藓生理生化的影响[J]. 生态学报，2017，37(3)：915 – 921. [Xie Min, Hui Rong, Liu Lichao, et al. Effects of snowfall on physiological and biochemical characteristics of *Bryum argenteum* distributed in desert moss crusts[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): 915 – 921.]

[6] Fan Lianlian, Tang Lisong, Wu Linfeng, et al. The limited role of snow water in the growth and development of ephemeral plants in a cold desert [J]. Journal of Vegetation Science, 2014, 25: 681 – 690.

[7] 郑新倩，郑新军，李彦. 准噶尔盆地南缘降水脉冲量级分布及其变化规律[J]. 干旱区研究，2012，29(3)：495 – 502. [Zheng Xinqian, Zheng Xinjun, Li Yan. Distribution and change of different precipitation pulse sizes in the southern marginal zone of the Junggar Basin, China[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(3): 495 – 502.]

[8] 马学喜，李生宇，靳正忠. 流沙地表层土壤化学性质对免灌造

林的响应——以古尔班通古特沙漠明渠防护林为例〔J〕. 水土保持通报,2015,35(4):206 - 212.〔Ma Xuexi,Li Shengyu,Jin Zhengzhong. Response of soil chemical properties to afforestation in surface of shifting sand:A case study on shelterbelt of open channel in Gurbantunggut Desert〔J〕. Bulletin of Soil and Water Conservation,2015,35(4):206 - 212.〕

〔9〕 范连连,马健,吴林峰,等. 古尔班通古特沙漠南缘草本层对积雪变化的响应〔J〕. 植物生态学报,2012,36(2):126 - 135.〔Fan Lianlian,Ma Jian,Wu Linfeng,et al. Response of the herbaceous layer to snow variability at the south margin of the Gurbantonggut Desert of China〔J〕. Chinese Journal of Plant Ecology,2012,36(2):126 - 135.〕

〔10〕 王雪芹,王涛,蒋进,等. 古尔班通古特沙漠南部沙面稳定性研究〔J〕. 中国科学 D 辑,2004,34(8):763 - 768.〔Wang Xueqin,Wang Tao,Jiang Jin,et al. Study desert sand surface stability in southern Gurbantunggut Desert〔J〕. Science in China Ser. D,2004,34(8):763 - 768.〕

〔11〕 Huang Gang,Su Yangui,Zhu Li,et al. The role of spring ephemerals and soilmicrobes in soil nutrient retention in a temperate desert〔J〕. Plant Soil,2016,406:43 - 54.

〔12〕 Noy-Meir I. Desert ecosystems:Environments and producers〔J〕. Annual Review of Ecology and Systematics,1973,4:25 - 51.

〔13〕 Beatley J C. Phenological events and their environmental triggers in Mojave Desert ecosystems〔J〕. Ecology,1974,55:856 - 863.

〔14〕 孙园园. 准噶尔荒漠植物幼苗定居的抗旱适应特性研究〔D〕. 新疆:石河子大学,2015.〔Sun Yuanyuan. Drought Adaptation Characteristics of Plant Seedling Establishment in Junggar Desert〔D〕. Xinjiang:Shihezi University,2015.〕

〔15〕 孙羽,张涛,田长彦,等. 增加降水对荒漠短命植物当年牧草生长及群落结构的影响〔J〕. 生态学报,2009,29(4):1 859 - 1 869.〔Sun Yu,Zhang Tao,Tian Changyan,et al. Response of grass growth and productivity to enhanced water input in ephemeral desert grassland in Gurbantunggut desert〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2009,29(4):1 859 - 1 869.〕

〔16〕 Jankju M. Individual performances and the interaction between arid land plants affected by the growth season water pulses〔J〕. Arid Land Research and Management,2008,22(2):123 - 133.

〔17〕 Miranda J D,Padilla F M,Lázaro R,et al. Do changes in rainfall patterns affect semiarid annual plant communities〔J〕. Journal of Vegetation Science,2009,20:269 - 276.

〔18〕 王烨. 新疆早春短命及类短命植物的物候观测〔J〕. 干旱区研究,1993,10(3):34 - 39.〔Wang Yie. Phenological observation of the early spring ephemeral and ephemeroid plant in Xinjiang〔J〕. Arid Zone Research,1993,10(3):34 - 39.〕

〔19〕 袁素芬,唐海萍. 新疆准噶尔荒漠短命植物群落特征及其水热适应性〔J〕. 生物多样性,2010,18(4):346 - 354.〔Yuan Sufen,Tang Haiping. Patterns of ephemeral plant communities and their adaptations to temperature and precipitation regimes in Dzungaria desert,Xinjiang〔J〕. Biodiversity Science,2010,18(4):346 - 354.〕

〔20〕 王雪芹,蒋进,雷加强,等. 短命植物分布与沙垄表层土壤水分的关系——以古尔班通古特沙漠为例〔J〕. 应用生态学报,2004,15(4):556 - 560.〔Wang Xueqin,Jiang Jin,Lei Jiaqiang,et al. Relationship between ephemeral plants distribution and soil moisture on longitudinal dune surface in Gurbantonggut desert〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology,2004,15(4):556 - 560.〕

〔21〕 刘忠权,刘彤,张荣,等. 古尔班通古特沙漠南部短命植物群落物种多样性及空间分异〔J〕. 生态学杂志,2011,30(1):45 - 52.〔Liu Zhongquan,Liu Tong,Zhang Rong,et al. Species diversity and spatial differentiation of ephemeral plant community in southern Gurbantunggut Desert〔J〕. Chinese Journal of Ecology,2011,30(1):45 - 52.〕

〔22〕 Gutierrez J R,Whitford W G . Chihuahuan desert annuals:Importance of water and nitrogen〔J〕. Ecology,1987,68:2 032 - 2 045.

〔23〕 Steyn H M,van Rooyen N,van Rooyen M W,et al. The phenology of Namaqualand ephemeral species:The effect of water stress〔J〕. Journal of Arid Environments. 1996,33:49 - 62.

〔24〕 姚俊强,杨青,毛炜峄,等. 西北干旱区大气水分循环要素变化研究进展〔J〕. 干旱区研究,2018,35(2):269 - 276.〔Yao Junqiang,Yang Qing,Mao Weiyi,et al. Progress of study on variation of atmosphere water cycle factors over arid region in Northwest China〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(2):269 - 276.〕

〔25〕 李江风. 新疆气候〔M〕. 北京:中国气象出版社,1991.〔Li Jiangfeng. The Climate in Xinjiang〔M〕. Beijing:China Meteorological Press,1991.〕

〔26〕 季方,叶玮,魏文寿. 古尔班通古特沙漠固定与半固定沙丘成因初探〔J〕. 干旱区地理,2000,23(1):32 - 35.〔Ji Fang,Ye Wei,Wei Wenshou. Preliminary study on the formation causes of the fixed and semi-fixed dunes in Guebantonggut desert〔J〕. Arid Land Geography,2000,23(1):32 - 35.〕

〔27〕 Chesson P,Huntly N. Short term instabilities and long-term community dynamics〔J〕. Trends in Ecology and Evolution,1989,4:293 - 298.

〔28〕 Walck J L,Hidayati S N,Dixon K W,et al. Climate change and plant regeneration from seed〔J〕. Global Change Biology,2011,17(6):2 145 - 2 161.

〔29〕 Holt G,Chesson P. Variation in moisture duration as a driver of coexistence by the storage effect in desert annual plants〔J〕. Theoretical Population Biology,2014,92(10):36 - 50.

〔30〕 曾凡江,郭海峰,刘波,等. 多枝柽柳和疏叶骆驼刺幼苗生物量分配及根系分布特征〔J〕. 干旱区地理,2010,33(1):59 - 64.〔Zeng Fanjiang,Guo Haifeng,Liu Bo,et al. Characteristics of biomass allocation and root distribution of *Tamarix ramosissima* Ledeb. and *Alhagi sparsifolia* Shap. seedling〔J〕. Arid Land Geography,2010,33(1):59 - 64.〕

〔31〕 贺转转,邢佳佳,陈玲,等. 植物幼苗抗逆机制研究进展〔J〕. 生物技术通报,2013(2):1 - 7.〔He Zhuanzhuan,Xing Jiajia,Chen Ling,et al. Review on progress of stress tolerance mechanisms of plant seedlings〔J〕. Biotechnology Bulletin,2013(2):1 - 7.〕

〔32〕 段桂芳. 模拟降水格局变化对红砂种子萌发和幼苗生长的影

响.〔D〕.兰州:甘肃农业大学,2016.〔Duan Guifang. Drought Adaptation Characteristics of Plant Seedling Establishment in Junggar Desert〔D〕. Lanzhou:Gansu Agricdultural University,2016.〕

〔33〕 Fenner M. Seeds the Ecology of Regeneration in Plant Community〔M〕. 2nd ed. UK:CAB I Publishing,2000:311 – 331.

〔34〕 常学礼,赵爱芬,李胜功.科尔沁沙地固定沙丘植被物种多样性对降水变化的响应〔J〕.植物生态学报,2000,24(2):147 – 151.〔Chang Xueli,Zhao Aifen,Li Shenggong. Responses of species diversity to precipitation change on fixed-dunes of the naiman banner gegion〔J〕. Acta Phytoecologica Sinica,2000,24(2):147 – 151.〕

〔35〕 辛智鸣,黄雅茹,章尧想,等.乌兰布和沙漠白刺与沙蒿群落多样性及其对降水的响应〔J〕.河南农业科学,2015,44(1):117 – 120.〔Xin Zhiming,Huang Yaru,Zhang Yaoxiang,et al. Community diversity of *Nitraria tangutorum* Bobr and *Artemisia sphaerocephala* in Ulanbuh desert and its response to precipitation〔J〕. Journal of Henan Agricultural Sciences,2015,44(1):117 – 120.〕

〔36〕 吴建国,苌伟,吕佳佳.气温和土壤湿度变化对 3 种典型荒漠植物种子发芽的影响〔J〕.环境科学研究,2009,22(3):343 – 349.〔Wu Jianguo,Chang Wei,Lv Jiajia. The effects of change in temperature and soil moisture on the seed germination of three typical desert plants〔J〕. Research of Environmental Sciences,2009,22(3):343 – 349.〕

〔37〕 田媛,李建贵,赵岩.梭梭幼苗死亡与土壤和大气干旱的关系研究〔J〕.中国沙漠,2010,30(4):878 – 884.〔Tian Yuan,Li Jiangui,Zhao Yan. Relationship between *Haloxylon ammodendron* seedling mortality and water content in soil and atmosphere〔J〕. Journal of Desert Research,2010,30(4):878 – 884.〕

Response of Herbaceous Plant Quantity to Different Water Input and Meteorological Factors in a Cold Desert

FAN Lian-lian[1,2,3], LI Yao-ming[1,2], Nataliia Terekhina[4], MA Xue-xi[1,2], MA Jie[1,3]

(1. *Xinjiang Institute of Ecology and Geography*, *Chinese Academy of Sciences*, *Urumqi* 830011, *Xinjiang*, *China*;
2. *Central Asia Center for Ecological and Environmental Research*, *Chinese Academy of Sciences*, *Urumqi* 830011, *Xinjiang*, *China*;
3. *Fukang Station for Desert Ecosystem Research*, *Chinese Academy of Sciences*, *Urumqi* 830011, *Xinjiang*, *China*;
4. *Saint-Petersburg State University*, *Saint-Petersburg*, *Russia*, 190121)

Abstract: Rainfall and atmospheric dryness play an important role in plant growth, especially in arid area. The herbaceous layer is an important component of the plant community in the Gurbantunggut Desert, China, and it generally depends on snow-melt water in early spring for germination and development, resultant with a short life span. However, few studies focused on the relationship between the growth of desert annual herbaceous plants and rainfall and atmospheric dryness. Therefore, our objectives were to determine how snow cover, precipitation and atmospheric dryness affected the ecological traits of the herbaceous plants in this typical arid zone. From 2009 to 2016, we applied four treatments of snow cover thickness (0, 50%, 100%, and 200% as well as 100% natural snow cover thickness) to investigate the species richness and density in 1 m × 1 m quadrats. The meteorological data and field data were used to analyze the relationship between the growth of desert annual herbaceous plants and rainfall and atmospheric dryness. It was found that thick snow cover could result in a high topsoil moisture content and then high seedling density. Although the snow cover regulated the seedling density, there was no significant difference between species richness and snow cover thickness within a year. During the period of 2009 – 2016, however, the species richness fluctuated inter-annually. It was inferred through the analysis of meteorological data that the species richness was mainly regulated by the rainfall during the seedling construction period. Moreover, the species richness in wet year would return to the normal level after a drought year. Vapor pressure deficit (VPD) of the atmosphere reflected the degree of atmospheric dryness, and there was a significant negative correlation between the number of survival herbaceous plants and VPD under the 100% snow cover treatment from 2009 to 2016, with the R^2 value at 0.611 ($P<0.05$). There was an opposite trend between the number of survival herbaceous plants and rainfall in growing season with R^2 at 0.162 ($P>0.05$). Obviously, atmospheric dryness was more likely to determine the survival of herbaceous plants.

Key words: desert plant; plant quantity; rainfall; atmospheric dryness; meteorological factor; Gurbantunggut Desert